计算地震初至波视出射角方法

何 斌1,张元生1,李 稳2

(1. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000; 2. 中国地震局地球物理勘探中心,河南郑州 450002)

摘 要:在理论上证明了使用地震初至波位移、速度或加速度记录资料在时间域或频率域计算视出 射角,使视出射角计算不受位移记录及时间域限制。在干扰信号频率段与有效信号频率段存在差 异时分别在时间域和频率域进行了视出射角计算,结果表明在频率域中得到的视出射角基本与理 论值相符,与方位角无关;而在时间域中获得的视出射角与理论值波动很大。应用实际地震波记录 资料计算了不同台站的视出射角,其结果同样表明在频率域中获得的视出射角比时间域视出射角 更加稳定和可信。

关键词: 地震初至波; 视出射角;优势频率; 时间域; 频率域 中图分类号: P315.3⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2010)01-0011-05

The Calculation Method of Apparent Emergence Angle of Seismic First-arrival Wave

HE Bin¹, ZHANG Yuan-sheng¹, LI Wen²

Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;
 The Geophysical Exploration Center of CEA, Zhengzhou 450002, China}

Abstract: In time domain or frequency domain, using displacement, velocity or acceleration of seismic first-arrival wave, the apparent emergence angles are separately calculated. In theory it is proved that calculating apparent emergence angle is not limited by displacement records and time domain. Considering the difference between frequency ranges of interference signal and effective signal, respectively in time domain and frequency domain the apparent emergence angles are calculated, the result shows that the apparent emergence angle in frequency domain basically is equal to the theoretical value, has nothing to do with the azimuth, but the angle has big fluctuation with theoretical value in time domain. It indicates that the apparent emergence angle is less affected by interference signal in frequency domain. Appling the method and using real seismic wave records, the apparent emergence angles of seismic first-arrival wave in some stations are calculated, the results indicate that the apparent emergence angle is more stable and credible in frequency domain than in time domain.

Key words: Seismic first-arrival wave; Apparent emergence angle; Dominant frequency; Time domain; Frequency domain

0 引言

地震的初至波视出射角在计算近震、地方震的 震源深度和震前短临预报等方面都是一个基础。基 于准确的视出射角的震源深度对于地震定位、深部 构造的研究和推测地震活动性等至关重要。另外, 运用地震前初至波视出射角的变化探索地震预报方

收稿日期:2009-10-30

基金项目:国家自然基金(40874029);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2010009 作者简介:何 斌(1985-),女(汉族),云南楚雄人,硕士研究生,研究方向为地震波理论与应用.

法也是非常有意义的。然而在以往的研究中往往将 大量的初至波视出射角的信息模糊掉,从而严重限 制了这些重要基础资料在地震定位和地震预报等方 面的应用^[1]。

真出射角是地震波入射射线与地面的夹角,视 出射角是地面位移矢量与地面的夹角。由于地震波 在地面上形成了反射波,所以视出射角不等于入射 波的真出射角。根据记录到的地面位移垂直分量和 水平分量的比值可确定视出射角。若将地球表面视 为自由表面,视出射角和真出射角的关系与地壳介 质的泊松比有关^[2]。根据真出射角和视出射角的关 系,对于单台可用较清晰三分向初动记录计算其视 出射角,再经查表^[3]可获得真出射角值和震源深度。 传统的出射角法地震定位^[4]仅利用单台资料,依赖 于单台三分向位移记录。由于该方法是一个近似计 算方法,具有较大的误差,得到的结果无法进行评 价,难以保证求得的震源深度的精确度。

数字地震仪具有非线性失真小,系统噪音低,信 噪比较高等优点。随着数字地震台网的建立和运行 获得了大量的地震波形资料,为地震的初至波视出 射角的计算提供了条件。视出射角的计算方法是本 文研究内容,通过对理论地震波形和实际记录波形 在时间域和频率域中进行初至波视出射角计算研 究,分析其影响因素,验证其方法的正确性和可行 性。

1 理论与方法

以观测点为坐标原点,规定正东、正北和垂直地 表向上分别为 x 轴、y 轴和 z 轴的方向。地震仪在 t 时刻记录到地震体波的位移可表示为

 $\bar{u}(x,y,z,t) = u_x(t)\bar{i} + u_y(t)\bar{j} + u_z(t)\bar{k} =$

 $u(t)(\cos e \sin \varphi + \cos e \cos \varphi + \sin e k)$ (1) 其中 $u_x(t), u_y(t)$ 和 $u_z(t)$ 分别是三个分向的记录波 形;u(t)是径向波形;e和 φ 分别是初至波的视出射 角和台站方位角。

地震波的三个分向位移记录波形及其对时间 *t* 的一阶和二阶导数可写成

$$\begin{cases} u_x(t) = u(t)\cos e\sin \varphi \\ u_y(t) = u(t)\cos e\cos \varphi \\ u_z(t) = u(t)\sin e \end{cases}$$
(2)

$$\begin{cases} v_{x}(t) = u'_{x}(t) = u'(t)\cos e\sin \varphi \\ v_{y}(t) = u'_{y}(t) = u'(t)\cos e\cos \varphi \\ v_{z}(t) = u'_{z}(t) = u'(t)\sin e \end{cases}$$
(3)

$$\begin{cases} a_{x}(t) = u''_{x}(t) = u''(t)\cos e\sin \varphi \\ a_{y}(t) = u''_{y}(t) = u''(t)\cos e\cos \varphi \\ a_{z}(t) = u''_{z}(t) = u''(t)\sin e \end{cases}$$
(4)

式(3)和式(4)分别表示地震波的速度记录和加速度 记录。一般在微震记录时采用的是地面运动速度记录,而在强震记录时采用的是地面运动加速度记录。

视出射角的计算公式[5]为

$$\tan e = \frac{|u_{z}(t)|}{\sqrt{u_{x}^{2}(t) + u_{y}^{2}(t)}}$$
(5)

根据 P 波的质点运动方向,在 t 时刻质点的位移、速 度和加速度向量是平行的,所以无论是用哪种记录 资料都可以直接计算视出射角。把式(2)、(3)和(4) 分别代入式(5)有

$$\frac{|u_{z}(t)|}{\sqrt{u_{x}^{2}(t)+u_{y}^{2}(t)}} = \frac{|v_{z}(t)|}{\sqrt{v_{x}^{2}(t)+v_{y}^{2}(t)}} = \frac{|a_{z}(t)|}{\sqrt{a_{x}^{2}(t)+a_{y}^{2}(t)}} = \frac{\sin e}{\cos e} = \tan e$$
(6)

以采样间隔为 ∆t,采样数为 N,式(2)可写成离 散形式:

$$\begin{cases} u_{xm} = u_x (m\Delta t) = u(m\Delta t) \cos e \sin \varphi \\ u_{ym} = u_y (m\Delta t) = u(m\Delta t) \cos e \cos \varphi \\ u_{xm} = u_z (m\Delta t) = u(m\Delta t) \sin e \\ m = 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{cases}$$
(7)

其 u_{xm}、u_{xm}和 u_{xm}的离散傅里叶变换应分别写成

$$\begin{cases} C_{x}(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} u_{xm} \left(\cos \frac{2\pi km}{N} - i \sin \frac{2\pi km}{N} \right) \\ C_{y}(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} u_{ym} \left(\cos \frac{2\pi km}{N} - i \sin \frac{2\pi km}{N} \right) \\ C_{z}(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} u_{zm} \left(\cos \frac{2\pi km}{N} - i \sin \frac{2\pi km}{N} \right) \\ k = 0, 1, 2, \cdots, N-1 \end{cases}$$
(8)

把式(7)代人式(8)得

$$\begin{cases} C_x(k) = \cos e \sin \varphi \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} u(m\Delta t) \\ \left(\cos \frac{2\pi km}{N} - i \sin \frac{2\pi km}{N} \right) \\ C_y(k) = \cos e \cos \varphi \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} u(m\Delta t) \\ \left(\cos \frac{2\pi km}{N} - i \sin \frac{2\pi km}{N} \right) \\ C_z(k) = \sin e \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} u(m\Delta t) \\ \left(\cos \frac{2\pi km}{N} - i \sin \frac{2\pi km}{N} \right) \\ k = 0, 1, 2, \cdots, N-1 \end{cases}$$
(9)

Ŷ

$$C(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} u(m\Delta t) \left(\cos \frac{2\pi km}{N} - i \sin \frac{2\pi km}{N} \right)$$
(10)

式(9)简化为

$$C_{x}(k) = C(k)\cos e\sin \varphi$$

$$C_{y}(k) = C(k)\cos e\cos \varphi$$

$$C_{z}(k) = C(k)\sin e$$
(11)

式(11)存在如下关系:

$$\frac{|C_z(k)|}{\sqrt{(C_x(k))^2 + (C_y(k))^2}} = \frac{\sin e}{\cos e} = \tan e \ (12)$$

式(12)与式(6)是严格等效的,这就证明了视出射角 可在频率域求取。根据傅里叶变换微分性质有

$$\begin{cases} \psi(k) = i \frac{2\pi k}{N} C(k) \\ \varphi(k) = \left(i \frac{2\pi k}{N}\right)^2 C(k) \\ F(u(m\Delta t)) \sim C(k), \\ F(u'(m\Delta t)) \sim \psi(k), \\ F(u''(m\Delta t)) \sim \varphi(k) \end{cases}$$
(13)

根据式(10)、(11)和(13)可获得速度和加速度 频谱,其存在下列关系:

$$\frac{|C_z(k)|}{\sqrt{(C_x(k))^2 + (C_y(k))^2}} = \frac{|\psi_z(k)|}{\sqrt{(\psi_x(k))^2 + (\psi_y(k))^2}}$$
$$= \frac{|\varphi_z(k)|}{\sqrt{(\varphi_x(k))^2 + (\varphi_y(k))^2}} = \frac{\sin e}{\cos e} = \tan e$$
(14)

由式(6)和式(14)可知,在时间域或频率域计算 地震初至波的视出射角时,无论使用何种记录资料 (位移、速度和加速度)都可直接计算,无需把速度和 加速度记录转为位移记录再求视出射角。

2 计算及结果

在实际地震观测记录初至波形中,信号强弱与 地震大小、震中距大小、仪器增益和观测环境等因素 有关,可以用信噪比来描述有效信号的质量(清晰程 度)。下面针对不同的信噪比从理论模拟和实际观 测资料计算来研究在时间域和频率域中获得的视出 射角变化。

2.1 理论计算及结果

为了进一步证实在频率域计算地震初至波的视 出射角更加优于时间域,首先构建一个波信号。不 失一般性,构建波方程

$$y(t) = u(t) + c(t)$$
 (15)

式中 u(t)为来自方位角 φ 、视出射角 e 的有效信号; c(t)为来自方位角 φ_c 、视出射角 e_c 的干扰信号。 u(t)和 c(t)可简单写成

$$u(t) = \sum_{i=1}^{I} a(i\Delta f) \sin(2\pi i\Delta f t + \varphi_1),$$

$$c(t) = \sum_{i=1}^{I} b(i\Delta f) \sin(2\pi i\Delta f t + \varphi_2)$$

$$a(i\Delta f) = \frac{A_0}{e^{+4-i\Delta f+}},$$

$$b(i\Delta f) = \frac{B_0}{e^{+14-i\Delta f+}}$$

 $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = 0, \Delta f = 0, 2, i = 1, 2, 3, \dots, I$

a和b分别为有效信号和干扰信号的不同频率下的 振幅;A。和 B。分别为有效信号和干扰信号的最大 振幅;I为频率点个数。式(15)的离散三分向形式 可写成

 $\begin{cases} u_x(i\Delta t) = u(i\Delta t)\cos e\sin \varphi + c(i\Delta t)\cos e_c\sin \varphi_c \\ u_y(i\Delta t) = u(i\Delta t)\cos e\cos \varphi + c(i\Delta t)\cos e_c\cos \varphi_c \\ u_z(i\Delta t) = u(i\Delta t)\sin e + c(i\Delta t)\sin e_c \\ u(i\Delta t \leqslant 0) = 0, \ i = 1, 2, 3, \dots, N \end{cases}$

(16)

 Δt 为时间采样率; N 为采样个数。对式(16) 分别改 变有效信号的方位角 φ 和视出射角e、干扰信号的方 位角 φ_e 和视出射角 e_e 以及 A_0 和 B_0 的比值,可获得 离散三分向的时间序列数据,并作 FFT 变换。结果 如图 1 和图 2 所示。

图 1 为在固定干扰信号视出射角 $e_c = 5°时, 在$ $四象限内对方位角 <math>\varphi_c$ 各取一值,其有效波视出射角 (理论值为 20°)在时间域和频率域的变化。在时间 域,方位角 φ 和 φ_c 对视出射角影响明显;另外视出 射角还与信噪比有关,信噪比增大,峰值个数减少。 在频率域,方位角 φ 和 φ_c 对视出射角影响不明显, 信噪比越大,视出射角更加接近理论值。

图 2 为在信噪比为 3:1 和干扰信号方位角 φ_e= 45°时,在时频域里分别计算干扰信号视出射角为 5°、10°、15°和 20°情况下的有效波视出射角(理论值 20°)和干扰波视出射角。在时间域视出射角变化明 显;而在频率域视出射角计算值与理论值差异很小。

理论计算表明,在频率域计算初至波的视出射 角优于时间域,同时还说明在不同波信号的频率存 在一定差异时应用该方法可以识别不同震相。

2.2 实际资料处理及结果

我们应用 2004 年甘肃临泽震群地震资料^[6-11], 挑选其波形记录清晰的两次地震震中距小于 320 km 的台站记录资料。地震参数见表 1。对这两次 地震事件各台站三分向波形数据进行预处理获得速 度值^[12],选取 4 096 个数据进行数字滤波^[13]。在此 基础上,以各台站初至波到时为起点分别对其三个 分向向后读取 128 个数据点(记录长度为 2.56 s)做 FFT 变换,计算其优势频率所对应得的视出射角值 (表 2)。



图1 不同信噪比的视出射角与方位角的变化关系(固定 e_c=5°)

Fig. 1 The change relations between apparent emergence angles and azimuths in different SNR (fixed $e_c = 5^\circ$).



图 2 视出射角与方位角的变化($\varphi_c = 45^\circ$, 信噪比为 3:1)

Fig. 2 The change relations between apparent emergence angles and azimuths ($\varphi_c = 45^\circ$, SNR is 3:1).

表1 地震参数信息

地震编号	发震日期	发震时刻	纬度/°	 经度/°	深度/km	震级/ML
Α	2004-06-10	15时36分3.0秒	39.05	100.07	21	4.5
В	2004-06-10	19时24分3.0秒	39.03	100.05	18	4.5

表 2	两次地震对应台站初至波视出射角

<u>له د</u>	地震A			地震 B		
百項	震中距/km	时域 e/°	频域 e/°	震中距/km	时域 e/°	频域 e/°
肃南	81.5	34.10	34.22	79.1	33.77	33.60
山丹	98.9	34.02	34.66	99.2	34.32	33, 54
祁连	103.0	34.33	33.87	100.9	33.73	33.59
河西堡	192.7	32.96	33.86	194.2	34.05	32.41
红崖子	224.8	34.22	33, 22	226.8	33.57	32.34
石岗	309.9	33.19	28.14	310.8	68.63	27.94

对于地震 A,震中距从 81.5 km 到 309.9 km, 随着震中距的增大频率域视出射角逐渐减小,符合

地震波射线理论;而时间域视出射角呈现波动变化。 对于地震 B,震中距从 79.1 km 到 310.89 km,随着 震中距的增大频率域视出射角存在与地震 A 相同 的变化特征,视出射角与震中距有明显的关联;时间 域视出射角波动较大。

地震 A 和地震 B 的相同台站视出射角存在差 异,即地震 A 大于和地震 B。在理论上,震中距相同,震源深度越深视出射角越大。地震 A 的震源深 度比地震 B 的深,因此地震 A 的各台站的视出射角 大于地震 B 对应台站的视出射角。但在时间域里 获得的视出射角没有这一规律,是因为在时间域里 计算视出射角时误差较大所至。

3 结论与讨论

在频率域计算视出射角优于时间域计算视出射 角,更加容易计算视出射角,其计算结果误差小。在 时间域计算视出射角误差较大的原因主要有:(1)由 于干扰 P 波初动准确识别困难;(2)信噪比越小误 差越大;(3)干扰信号与有效信号的方位角和视出射 角不一致有关;(4)不同频率信号之间存在相位差等 因素都会影响到视出射角的计算值。在频率域计算 视出射角的优点:首先克服了在实际震相识别中初 至波起点难以确定问题;避免了不同频率信号之间 存在的相位差造成的影响;在有效信号主频(优势频 率)与干扰信号的主要能量频段不重迭的情况下,即 使信噪比不高、干扰信号与有效信号的方位角和视 出射角不一致也可以获得较高精度的计算结果。

致谢:感谢王恒知在论文修改过程中给予的指 导和帮助。

[参考文献]

- 李稳,张元生. 地震波到时与视出射角联合定位方法研究[J].
 西北地震学报,2009,31(3):34-39.
- [2] 李稳. 地震波到时与视出射角联合定位方法研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所,2008.
- [3] 韩庆丑. 地震波真出射角及震源深度表[J]. 地震,1981,(5): 22-23.
- [4] 朱海林.用视出射角法求震源深度的一种近似修正法[J]. 地震 学刊,1985,(3):33-38.
- [5] 傅淑芳,刘宝诚.地震学教程[M].北京:地震出版社,1991:83-85.
- [6] 李清河,张元生,涂毅敏.祁连山一河西走廊地壳速度结构及速 度与电性的联合解释[J].地球物理学报,1998,41(2):197-209.
- [7] 莘海亮,张元生,郭晓,等. 2004 年 6 月甘肃临泽震群地震精确 定位[J].西北地震学报,2008,30(1):71-74.
- [8] 郭晓,张元生,莘海亮,等. 祁连山中东段地区非弹性衰减系数、震源参数和场地响应研究[J].西北地震学报,2007,29(4): 319-325.
- [9] 张元生,李清河,徐果明.联合利用走时与波形反演技术研究地 壳三维速度结构(Ⅰ) ——理论与方法[J].西北地震学报, 1998,20(2):8-15.
- [10] 张元生,李清河,徐果明.联合利用走时与波形反演技术研究 地壳三维速度结构(Ⅱ)──应用[J].西北地震学报,1998,20 (3):8-15.
- [11] ZHANG Yuan-sheng, ZHOU Min-du, RONG Dai-lu, et al.
 3-D velocity structure in the central-eastern part of Qilianshan[J]. ACTA SEISMOLOGICA SINCA, 2004, 17(3): 272-281.
- [12] 陈运泰,吴忠良,王培德,等.数字地震学[M].北京:地震出版 社,2000:55-65.
- [13] 陈玉东. 数字信号处理[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 146-148.